

Besser

Optimale Bahnzugregelung mit
dSPACE-Prototyping-System

Bahnen ziehen





Abbildung 1: Papierstreichanlage VESTRA – Pilot-Coater der Papiertechnischen Stiftung, München.

Beschichtet man Papier in einer Streichanlage, kann es entweder eine glänzende oder eine matte, ebene und geschlossene Oberfläche erhalten. Durch diese Veredelung zu gestrichenem Papier erfüllt es höchste Ansprüche der Druckwiedergabe. Bei der Herstellung von gestrichenem Papier kommt es allerdings immer wieder zu Bahnabrissen und damit zu Produktivitätsverlusten. Die Streichanlagen können Schwankungen im Bahnzug bisher nicht oder nicht ausreichend kompensieren.

In Streichanlagen werden bei kontinuierlicher Fertigung Papierbahnen in unterschiedlichen Sektionen bearbeitet. Das Papier durchläuft verschiedene Bearbeitungsschritte mit elastischen oder plastischen Verformungen. Gleichzeitig sind die einzelnen Teilsysteme durch die Papierbahn miteinander verkoppelt. Dadurch wird die Stabilität der Bahn in der gesamten Streichanlage signifikant beeinflusst, was bis hin zu Papierbahnabrissen und damit zu Produktionsausfällen führt. Herkömmliche Bahnzugregelungen können Schwankungen im Bahnzug, verursacht durch Änderung der physikalischen Parameter der Papierbahn, durch Störungen oder durch Verkopplungseffekte über die

Stoffbahn in der gesamten Anlage, bisher nicht oder nicht ausreichend kompensieren. Unruhiger Bahnlauf führt insgesamt zu einer minderen bis unbrauchbaren Produktqualität (vor allem während des An- und Abfahrens der Streichanlage). Unser Ziel war es daher, eine verbesserte Regelung des Bahnlaufs über die Stabilisierung der Bahnspannung zu entwickeln, wobei die gesamten elektrischen und mechanischen Systeme berücksichtigt wurden.

Systemmodell der Versuchsstreichanlage

Für den Entwurf eines optimalen Reglers und die anschließende Implementierung in der Versuchsanlage war ein fundiertes Verständnis

der physikalisch-technischen Zusammenhänge des Gesamtsystems im Hinblick auf den zu optimierenden Bahnlauf unumgänglich. Mit Hilfe gesammelter Anlagendaten und der bekannten nichtlinearen physikalischen Systembeschreibung (Fluidmechanik und Elastizitätstheorie) konnte das Gesamtsystem modelliert, simuliert und analysiert werden. Als wichtigste Komponenten der Anlage wurden die über die Papierbahn miteinander verkoppelten Teilsysteme identifiziert:

- Antriebssystem (Motor, Getriebe, Welle und Kupplung)
- Walze zur Führung der Papierbahn
- Papierbahn (Stoffbahn)

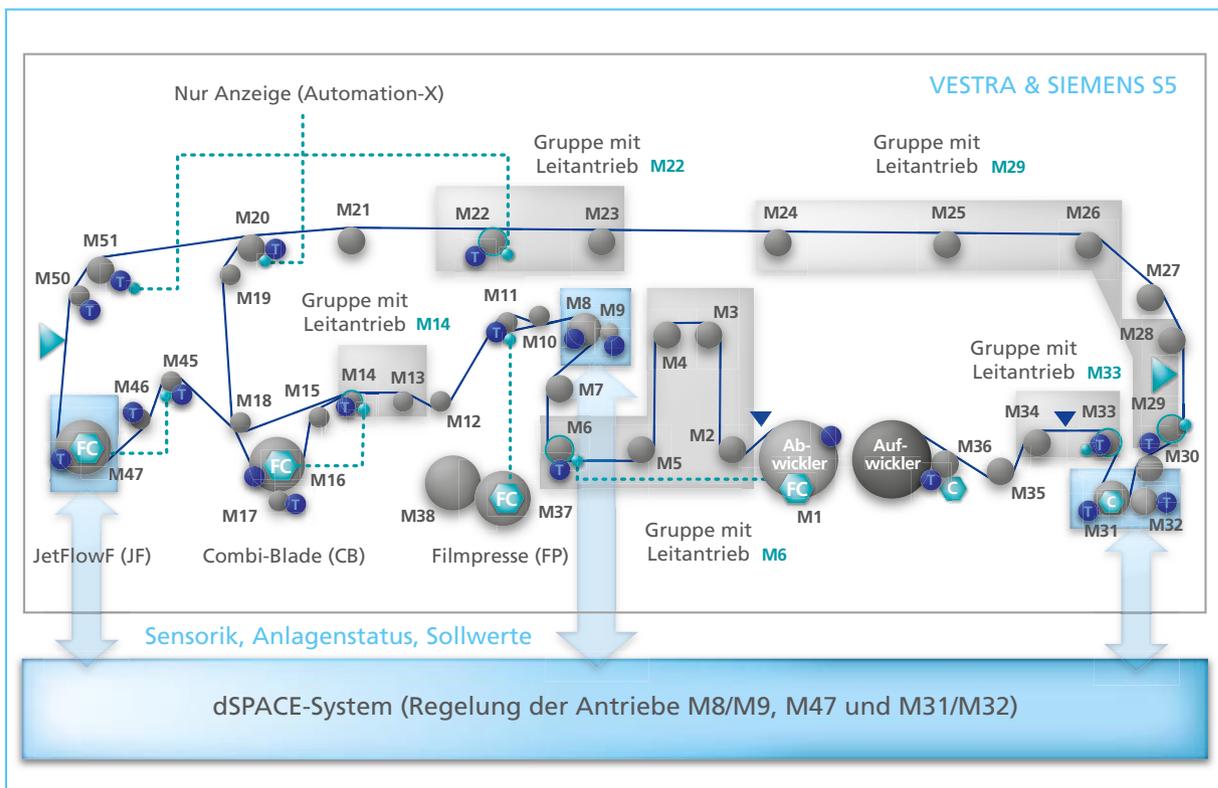


Abbildung 2: Versuchsstreichanlage VESTRA mit Schnittstelle zum dSPACE-System für das Testen und Verifizieren der neuen Regelstrukturen.

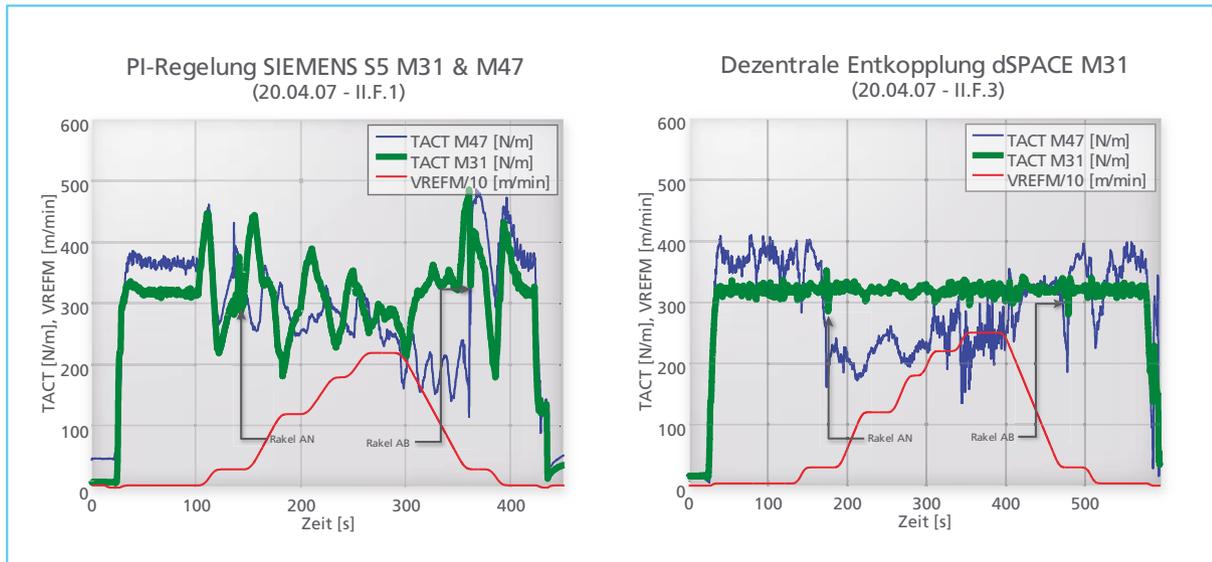


Abbildung 3: Vergleich zwischen herkömmlicher PI-Kaskadenregelung (SIMATIC S5) und Dezentraler Entkopplung (dSPACE) an Zugpresse M31/M32 bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Diese Komponenten beschreiben das Verhalten der Papierbahn in Abhängigkeit der Antriebseinheiten (Motor und Walze) und der möglichen Lasteinflüsse durch Reibung oder durch den Einsatz des Dosierelements „Rakel“ am Auftragsaggregat. Unser Systemmodell erlaubt es, die Anlagenvorgänge offline zu untersuchen und neue Strategien einfach zu testen.

Eigenschaften der verbesserten Regelstrukturen

Bei allen kontinuierlichen Fertigungsprozessen, bei denen eine Papierbahn durch verschiedene Teilsysteme befördert wird, tritt ein kompliziertes Gesamtverhalten der Anlage bezogen auf die Papierbahn auf. Die einzelnen Bearbeitungssektionen und/oder Klemmstellen (Zugpressen oder umschlungene Walzen) sind über die Papierbahn miteinander verkoppelt. Störungen, die z. B. beim Bahnzug auftreten, werden von einem Teilsystem angenommen und an andere weiterge-

geben. Die Regelstrukturen müssen daher die folgenden Eigenschaften haben:

- Gutes Führungsverhalten (geringe Anregelzeit und Überschwingweite)
- Robustheit (Umgang mit veränderlichen Systemparametern)
- Gute Entkopplung bzw. Vermeidung der Ausbreitung von Störungen

Um die neuen Regelstrukturen auch direkt an der Versuchsstrechanlage VESTRA umzusetzen, also implementieren zu können, setzten wir auf Rapid Control Prototyping mit Hilfe eines dSPACE-Systems. Das dSPACE-System wurde über eine speziell entwickelte elektronische Schnittstelle mit der VESTRA verbunden (Abbildung 2) und erlaubte eine direkte Regelung der Antriebe M8/M9 (Zugpresse 1), M47 (Auftragsaggregat) und M31/M32 (Zugpresse 2).

Dezentrale Entkopplung

Unser erster Lösungsansatz zur Stabilisierung des Bahnlaufs ist die Dezentrale Entkopplung. Die herkömmliche PI-Kaskadenregelung (Reglerstruktur in SIMATIC S5) und die Dezentrale Entkopplung wurden simulativ auf Regelgüte, Robustheit und Entkopplungseigenschaften untersucht. Es zeigte sich, dass das simulierte Anlagenverhalten mit PI-Kaskadenregelung qualitativ und nahezu auch quantitativ das reale Anlagenverhalten widerspiegelte, wenn zusätzlich die Verzögerungen durch langsame Zyklus- und Kommunikationslaufzeiten berücksichtigt wurden. Zunächst wurde die bisherige PI-Kaskadenregelung sowohl mit dem Siemens SIMATIC S5 und dem dSPACE-System getestet. Regleraufbau und Auslegung waren identisch. Aber schon die schnelle Zykluszeit des dSPACE-Systems, also die Rechenzeit des Mikroprozessors für eine Abarbeitung des programmierten Algorithmus, und

das Wegfallen der Profibuslaufzeiten, da das dSPACE-System im Gegensatz zum SIMATIC S5 direkt mit den Umrichtern verbunden ist, führen zu einer deutlich verbesserten Regelgüte mit dem dSPACE-System. Dagegen bleiben die Auswirkungen der Verkopplung durch die Papierbahn annähernd gleich. Die Dezentrale Entkopplung an der Zugpresse M31/M32, implementiert auf dem dSPACE-System, reagiert sichtlich schneller und effektiver auf beispielsweise die Ausbreitung von Bahnzugschwankungen, hervorgerufen durch das An- und Ablegen des Dosierelements oder die Veränderung der Anlagengeschwindigkeit VREFM. Der Bahnzug TACT M31 (Bahnspannung) an der Zugpresse M31/M32 ist deutlich ruhiger (Abbildung 3). Die Dezentrale Entkopplung bietet im Vergleich zur herkömmlichen PI-Kaskadenregelung eine hohe bis sehr hohe Regelgüte, d. h. schnelles Führungs- und gutes Störverhalten,

bei breiter Robustheit, um auch bei unterschiedlichen Produktionsbedingungen eingesetzt werden zu können.

Rakelvorsteuerung

Beim Streichvorgang von Papier ist einer der kritischsten Momente das Anlegen des Dosierelements „Rakel“, das die überschüssige Farbe abstreift. Die Rakel belastet dabei die Gegenwalze des verwendeten Auftragsaggregats und erzeugt ein Lastmoment $M^*_{L,i}$, das zum Zeitpunkt des Anlegens einen impulsförmigen Verlauf annimmt. Das Zuschalten der Farbe bewirkt zum einen eine Änderung der Papiereigenschaften (Elastizitätsmodul $\Delta E_{i-1,i}$) und zum anderen eine Art „Schmierung“ zwischen Rakel und Papierbahn. Somit reduziert sich das wirkende Moment auf einen annähernd konstanten Wert, der dauerhaft während des Streichvorgangs durch den Antrieb der Gegenwalze kompensiert werden

muss, um die gewünschte Geschwindigkeit bzw. Bahnkraft zu halten. Ohne eine Vorsteuerung verursacht diese erst impulsförmige und dann dauerhafte Belastung der Gegenwalze einen deutlichen Drehzahlbruch, der unweigerlich in einen Einbruch des Bahnzugs der Klemmstelle sowie in einen Anstieg im folgenden Teilsystem münden muss. Aufgrund der Bahnzugschwankungen TACT M47 am Auftragsaggregat erhöht sich die Gefahr eines Bahnabrisses. Daher ist unser zweiter Lösungsansatz eine Rakelvorsteuerung, die modular und unabhängig vom momentan verwendeten Regelalgorithmus des betroffenen Auftragsaggregats implementiert werden kann. Wenn die Zeitpunkte des An- und Ablegens der Rakel bzw. Start und Ende des Farbauftrags bekannt sind, kann die entwickelte Rakelvorsteuerung eingesetzt werden, die durch ein Vorsteuermoment MFFC_Blade mit einem

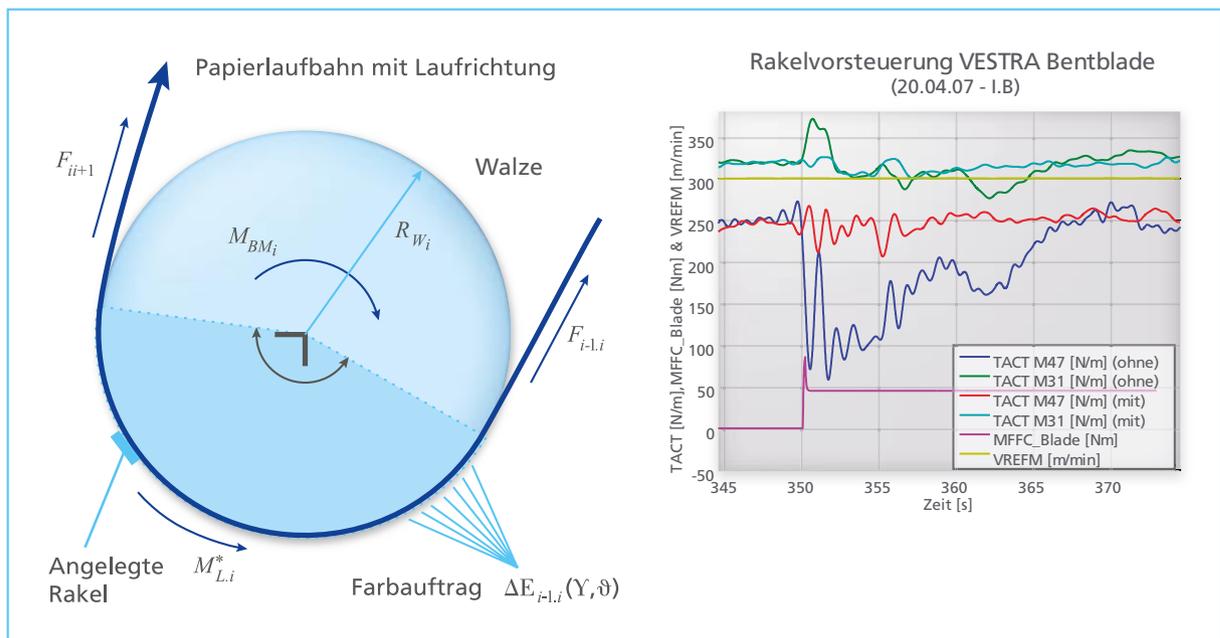


Abbildung 4: Auftragsaggregat M47 (Jetflow F) mit Rakel (hier: Bentblade) – Vergleich mit und ohne Rakelvorsteuerung.



Glossar

Dezentrale Entkopplung – Speziell ausgelegte Zustandsregelung, die die Koppelleinflüsse des Restsystems auf ein Teilsystem minimiert.

Kaskadenregelung – Ineinandergeschachtelte Regelkreise. Dabei wird die Gesamtstrecke in kleinere Regelstrecken geteilt, um die jeweilige Reglerauslegung und -implementierung zu vereinfachen.

Klemmstelle – Nach der idealen Modellvorstellung jedes Teilsystem, bei dem die Produktbahn nicht durchrutscht bzw. seitlichem Versatz ausgesetzt ist.

„Schon die schnelle Zykluszeit des dSPACE-Systems führte zu einer deutlich verbesserten Regelgüte.“

Christoph Hackl, Technische Universität München

z. B. empirisch ermittelten Verlauf das auftretende Lastmoment nahezu vollständig kompensiert. Die Rakelvorsteuerung wurde implementiert und deren Anwendbarkeit simulativ und experimentell an der VESTRA validiert. Eine exakte Kompensation konnte nahezu erreicht werden (Abbildung 4).

Ergebnis

Wir entwickelten eine Simulationstoolbox mit modularen Simulationsbausteinen einzelner Klemmstellen (Antrieb, Walze und Papierbahn) sowie der gesamten VESTRA. Damit konnten die neuen Regelstrukturen der Dezentralen Entkopplung und der Rakelvorsteuerung über Simulationen effektiv

getestet und offline verifiziert werden. Mit der erweiterten elektronischen Schnittstelle zwischen dSPACE-System und der VESTRA wurden die Verfahren schließlich direkt an der Anlage implementiert. Die Dezentrale Entkopplung bietet ein einfaches, effizientes und automatisierbares Werkzeug zur Reglerauslegung von verkoppelten Teilsystemen in der kontinuierlichen Fertigung. Sie erreicht eine hohe bis sehr hohe Regelgüte sowie ein schnelles Führungs- und gutes Störverhalten bei hoher Robustheit, um auch bei unterschiedlichsten Produktionsbedingungen eingesetzt werden zu können. Für einen besonders ruhigen Bahnlauf sollte

die Dezentrale Entkopplung an jeder definierten Klemmstelle eingesetzt werden.

Die Rakelvorsteuerung senkt das Risiko eines Bahnrisse deutlich. Der Einfluss des An- bzw. Ablegens kann nahezu vollständig kompensiert werden.

Beide Regelungskonzepte und die Simulationstoolbox sind generell für die Anwendung in der kontinuierlichen Fertigung (Papier-, Folienindustrie etc.) geeignet. Unsere Ergebnisse zeigen einen deutlich ruhigeren Bahnlauf aufgrund stabilerer Bahnzüge, die die Nachteile der herkömmlichen Regelung überwinden und das Risiko von Bahnrisse und somit von Produktionsausfällen minimieren. ■

*Christoph M. Hackl
Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme (EAT)
Technische Universität München
Deutschland*

*Beatrix Mair
Papiertechnische Stiftung (PTS)
München
Deutschland*